Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 36, 4, 2024. (21-34)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Numerical Verification of the Effect of Side Wind on the Staircase of a Tall Building with Pyrosim Software

Research Article

Fatemeh Behbahani[1], Mahdi Hamzei[2], Zahra Mehrdoost[3], Mohammad Moghiman[4]

https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.81802.1178

Abstract *High-rise buildings are usually exposed to wind. Except for the chimney effect, smoke movement and fire behavior are strongly influenced by external wind forces. In this research, the effect of side wind was investigated numerically with Pyrosim software and using the Navirastox equations, energy, mass survival, fire and smoke distribution, and the large eddy simulation model was used for turbulence. For validation, the results were compared with Zhao et al.'s research. The side wind speed was considered between 0 and 1.2 m/s. The effect of side wind on smoke temperature was evaluated at different released heat. The released heat was considered in three modes of 300, 500 and 900 kW. In the case of constant released heat, the temperature should increase at first until it reaches a temperature peak, then the temperature decreases with the increase in wind speed. Also, with the increase in wind speed, the concentration of carbon monoxide increased by about 3%. The results showed that the side wind increases the risk of fire and should be considered in the design of buildings exposed to the wind*.

Key Words Smoke Movement, Fire Behavior, Side Wind, Pyrosim Software, Smoke Temperature.

1- Introduction

The rise in population and contemporary urban living patterns have prompted urban areas to adopt vertical development, resulting in residents inhabiting tall structures. Conversely, both natural and human-induced disasters are an inherent aspect of human existence, with fires being a notable example. Fires occurring in high-rise commercial buildings present distinctive challenges and circumstances due to the unique design and capacity of these structures. Fires in high-rise buildings can result in significant financial losses and loss of life. The evacuation process in these structures can consume substantial resources, lead to the closure of large city areas, and pose a risk to many individuals if not managed effectively. Managing smoke and airflow presents a significant challenge in these buildings, with toxic gases being a primary cause of fatalities in building fires. Therefore, effective smoke control measures are crucial. High-rise buildings are often exposed to wind, which, aside from the chimney effect, greatly influences the movement of smoke and behavior of fires. In the event of a fire in large and tall buildings, the spread of smoke is primarily facilitated by horizontal corridors, shafts, and vertical staircases. When the chimney effect takes place, the rapid dispersion of smoke is facilitated through vertical shafts and staircases. This phenomenon is primarily attributed to the influence of chimneys, turbulent air currents, and external wind pressures. In this study, an examination was conducted on a staircase within a 6-story building subjected to lateral external wind using Pyrosim software. The findings were then compared with the research conducted by Zhao et al. various wind speeds and levels of released heat were taken into account, resulting in the analysis of smoke distribution and temperature changes caused by external side wind.

2-Simulation

In Zhao et al.'s study, the focus is on analyzing the geometry of a vertical structure resembling a shaft or staircase comprising six floors and an elongated corridor. The researchers utilized Pyrosim software to simulate this configuration. The shaft stands at a height of 30 meters, with dimensions of 4 meters in length and 3 meters in width. Each floor within the shaft is 5 meters in height. The corridor, on the other hand, measures 12 meters in length, 4 meters in width, and 5 meters in height, featuring an entrance door sized at 3 4 meters and a window on the upper floor measuring 3 2 meters. The wind direction is perpendicular to the upstairs window. Temperature measurements were conducted using five thermocouples positioned within the shaft or staircase. Heat release rates of 300, 600, and 900 kW were considered, alongside side wind speeds ranging from 0 to 1.2 m/s. The ambient temperature throughout the experiment was maintained at 30˚C. 3-Result In this study, various scenarios were

*Manuscript received: April 2, 2023. Revised, February 2, 2024, Accepted, May 14, 2024.

[1] Corresponding Author: Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. **Email:** behbahani.fatemeh652@gmail.com.

[2] Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

[3] Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

[4] Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

examined to analyze the impact of a fire occurring in a staircase. The heat release rates were set at 300, 600, and 900 kW. Wind speeds ranging from 0 to 1.2 m/s were evaluated for each of the three heat release conditions. The findings pertaining to temperature variations, carbon monoxide levels, and pressure differentials are detailed in the results. In order to validate their findings, Zhao et al. juxtaposed the laboratory temperature data against the outcomes of their simulations. Specifically, the temperature within the stairwell at an elevation of 2.9 meters was contrasted with a heat release rate of 300 kilowatts, under the assumption of a wind speed of 1 m/s. The empirical observations were found to align closely with the computational results derived from the simulation. Following combustion, a swift escalation in temperature within the shaft was noted, suggesting the inward flow of hot smoke within the shaft due to buoyancy and flue dynamics.

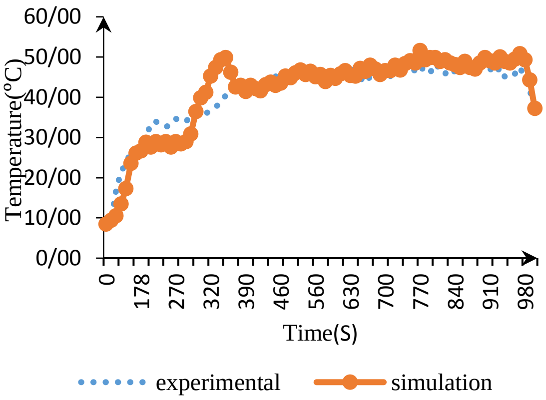


Figure 1. Comparison of laboratory temperature and simulation at a height of 2.9 meters with released heat of 300 kilowatts and wind speed of 1 meter per second

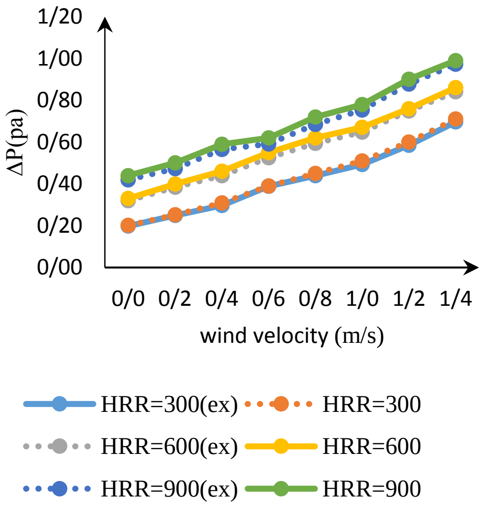


Figure 2. Comparing the pressure difference of the lower door with the wind speed in experimental and numerical mode with different released heat

The study verified the numerical assessment of the pressure differential at the lower door in relation to wind velocity. The analysis considered factors such as pressure differential, thermal pressure variance, and pressure reduction due to external wind, which escalates notably with higher external wind speeds. Findings indicate a positive correlation between wind speed, heat release, and pressure differential. Consequently, it is inferred that external wind intensifies the chimney effect, leading to the expulsion of hot gases within the stairwell.

The stairwell's temperature was assessed at various heights, revealing a uniform distribution of temperature within the shaft with variations of less than 5 degrees Celsius. Changes in temperature due to side wind speed fluctuations can be categorized into two distinct patterns: when 300 kW of heat is released, the column's temperature initially peaks before declining as wind speed increases. This phenomenon can be attributed to the dual impact of side winds. On one hand, the influx of fresh air in the corridor enhances fuel evaporation and combustion intensity, thereby elevating the column's temperature. Conversely, the entry of ambient air into the column exerts a significant cooling effect. Moreover, high wind speeds can induce robust convective heat transfer from the column to its surroundings, further contributing to temperature reduction through the wind's cooling effect. The study findings suggest that variations in wind speed do not significantly impact temperature changes in the presence of released heat. This is attributed to the heightened influence of released heat on inhibiting wind cooling effects within this specific range of wind speed, resulting in a lack of temperature decrease. Additionally, the research outcomes indicate that released heat plays a significant role in influencing temperature peaks. Toxic gases are a primary factor contributing to fatalities in fires. The presence of carbon monoxide is evenly dispersed within staircases in correlation with external wind patterns. When wind is present, smoke ascends at a slower rate, and the airflow is impeded by the wind, leading to a rise in carbon monoxide levels due to reduced air circulation through the entrance door. In cases where the fire originates near the door, restricting airflow through the entrance directly impacts combustion efficiency, resulting in heightened carbon monoxide production. Additionally, as the staircase height increases, smoke concentration also rises. Findings indicate that under constant heat release conditions, carbon monoxide levels escalate with higher external wind velocities.

4- Discussion

This study examined the dispersion of smoke, smoke temperature, and fire behavior within a stairwell or shaft of a high-rise building under the influence of ambient lateral wind, and contrasted these findings with the laboratory outcomes reported by Zhao et al. The implications of this research are significant for engineers and firefighters involved in the development of fire smoke management systems and the evacuation of individuals stranded in fires exacerbated by lateral wind effects. When the external wind impacts the upper window of a staircase or shaft, it results in a pressure drop. This causes smoke to be drawn towards the staircase from the entrance door due to the wind flow. Higher wind speeds and greater pressure differentials accelerate the release of smoke. The reduced pressure diminishes the amount of air entering through the entrance door, leading to incomplete combustion. Consequently, the concentration of hazardous carbon monoxide gas rises. This heightened presence of toxic gases poses a risk to individuals, necessitating a prompt evacuation of the building.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

دانشگاه فردوسی مشهد

بررسی عددی تأثیر باد جانبی در راه‌پله ساختمان بلند با نرم‌افزار پایروسیم*

مقاله پژوهشی

فاطمه بهبهانی [(۱)]   مهدی حمزه ای [(۲)]   زهرا مهردوست[(۳)]   محمد مقیمان[(۴)]

https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.81802.1178

چکیده ساختمان‌های با ارتفاع زیاد معمولا در معرض وزش باد هستند. به جز اثر دودکشی، حرکت دود و رفتار حریق به شدت تحت تأثیر نیروهای باد خارجی می‌با شد. در این پژوهش تأثیر باد جانبی به صورت عددی با نرم‌افزار پایرو سیم و به‌کارگیری معادلات ناویرا ستوکس، انرژی، بقای جرم، حریق و توزیع دود بررسی شد و برای آشفتگی از مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شده است. برای اعتبارسنجی نتایج با پژوهش ژاو و همکاران مقایسه گردید. سرعت باد جانبی بین 0 تا ۱/۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. تأثیر باد جانبی بر دمای دود در گرمای آزاد شده مختلف ارزیابی شد. گرمای آزاد شده در سه حالت ۳۰۰، ۵۰۰ و ۹۰۰ کیلووات در نظر گرفته شد. در گرمای آزاد شده ثابت، دما در ابتدا افزایش می‌یابد تا به یک پیک دمایی بر سد سپس با افزایش سرعت باد میزان دما کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت باد میزان غلظت کربن مونوکسید حدود ۳٪ بیشتر شد. نتایج نشان داد که باد جانبی، خطر حریق را افزایش می‌دهد و می‌بایست در طراحی ساختمان‌های در معرض باد مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی حرکت دود، رفتار حریق، باد جانبی، نرم‌افزار پایروسیم، دمای دود.

مقدمه

افزایش جمعیت و شیوه زندگی امروزی، شهر را به توسعه عمودی و شهروندان را به زندگی در ساختمان‌های بلند سوق داده است [1]. از طرفی وقوع حوادث و سوانح طبیعی و انسان‌ساخت جزو اجتناب‌ناپذیر زندگی بشری هستند. یکی از عوامل تهدید کننده ساختمان‌ها بحث حریق و آتش‌سوزی در آن‌ها است. میزان حساسیت به حریق در طراحی سازه‌ها در ساختمان‌های متفاوت بسته به کاربری و تصرف آن‌ها متفاوت است. هر چه سازه از نظر اجتماعی، سیاسی و یا اقتصادی مهم‌تر باشد توجه به بحث ایمنی نیز در آن اهمیت بیشتری دارد. در طراحی و ساخت چنین سازه‌هایی باید اصول ایمنی کاملا رعایت شوند. برای این کار طراح باید با رفتار ساختمان‌ها و مصالح ساختمانی در برابر آتش آشنایی کافی داشته باشد. آتش‌سوزی علاوه بر خسارات مالی بسیار می‌تواند باعث آسیب به سلامت افراد و رخ دادن آسیب‌های روحی نیز شود که این خسارات می‌توانند در مواردی کاملا جبران‌ناپذیر باشند. در نتیجه، جلوگیری از وقوع چنین حوادثی و علاج واقعه قبل از وقوع بسیار مهم است و می‌تواند این آسیب‌ها را تا حد قابل قبولی کاهش دهد. حریق در ساختمان‌های تجاری با ارتفاع زیاد چالش-ها و شرایطی را به وجود می‌آورد، زیرا این ساختمان‌ها از نظر طراحی و ظرفیت منحصر به فرد هستند [2]. آتش‌سوزی در این ساختمان‌ها علاوه بر خسارت‌های جانی، هزینه‌های تعمیرات و خسارت‌های مالی عمده‌ای بر جای می‌گذارد. تخلیه در این ساختمان‌ها می‌توانند منابع عظیمی را به هم گره بزنند، مناطق

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۱/۱۳ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۲/۲۴ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: دانشجودکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

Email: behbahani.fatemeh652@gmail.com

(۲) استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

(۳) استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

(۴) استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

وسیعی از شهر را تعطیل می‌کند و اگر مدیریت تخلیه به صورت مؤثر اتفاق نیفتد، می‌تواند زندگی افراد زیادی را به خطر بیندازد [3]. کنترل دود و جریان هوا یکی از چالش‌های بزرگ این ساختمان‌ها می‌باشد. به طور کلی گازهای سمی عامل اصلی مرگ و میر در حریق ساختمان‌ها هستند [4]. بنابراین کنترل دود بسیار اهمیت دارد. در حریق ساختمان‌های بزرگ و بلند، راهروهای افقی و شافت‌ها و راه‌پله‌های عمودی عامل اصلی گسترش دود هستند. اگر اثر دودکشی اتفاق بیفتد، شافت‌ها و راه‌پله‌های عمودی بسیار سریع دود را گسترش می‌دهند. گسترش دود به طور اساسی از طریق اثر دودکشی، جریان‌های آشفته و نیروهای باد خارجی ایجاد می‌شود [5]. تحقیقات قابل توجهی به منظور بررسی اثر دودکشی و ویژگی‌های صعود دود بدون در نظر گرفتن اثر باد خارجی برای چندین دهه انجام شد [6]. کی (Qi) و همکاران مکان سطح صفحه خنثی در یک شافت بلند را بررسی کردند. این مکان جایی است که فشار داخلی شافت برابر با فشار کف ساختمان در همان ارتفاع می‌باشد. آنها بیان کردند که پخش دمای غیریکنواخت توده دود در یک شافت یک فاکتور اساسی در مشخص کردن سطح صفحه خنثی می‌باشد [7]. جی (Ji) و همکاران خصوصیات بالارونده توده دود و پخش دما در یک راه‌پله با مقیاس کوچک را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که زمان رسیدن پلوم دود به ارتفاع معین با گرمای آزاد شده نسبت معکوس دارد [8]. لی (Li) و همکاران یک مدل برای پیش‌بینی فرآیند اختلاط آشفته ایجاد شده از انتقال حرارت توده دود به مرزها را ارائه دادند. مطالعات قبلی در شافت‌های بسته، انتقال حرارت از پلوم دود شناور داغ به مرزها مانند دیوارها را در نظر نگرفته بود. مقایسه مدل پیش‌بینی شده و نتایج تجربی نشان داد که مدل اختلاط آشفته قبلی بدون اثر مرزی دماهای بالاتری در راه‌پله در مقایسه با داده‌های تجربی پیش‌بینی کردند [9]. لین (Lin) و همکاران تأثیر تهویه را بر اثر دودکشی ناشی از آتش ارزیابی کردند و یک روش نظری برای توصیف اثر دودکشی در ساختمان‌های بلند ارائه دادند. با توجه به نتایج مشخص شد که تهویه تأثیر پیچیده‌تری بر حریق نسبت به اثر دودکشی ناشی از آب و هوا دارد هم‌چنین روش در نظر گرفته شده به خوبی توزیع فشار در ساختمان‌های بلند را پیش‌بینی می‌کنند [10].

آتش‌سوزی ساختمان‌های بلند اغلب تحت تأثیر بادهای محیطی قرار می‌گیرد [11]. به خصوص برای ساختمان‌های بلند، باد محیط با افزایش ارتفاع قوی‌تر می‌شود [12]. هنگامی که ساختمان‌ها در معرض باد قرار می‌گیرند، فشار باد مثبت بر ساختمان رو به جریان باد اثر می‌گذارد، در حالی که فشار باد منفی در طرف‌های دیگر ساختمان جریان دارد [13]. در بیشتر حوادث آتش‌سوزی، باد خارجی به تسریع انتشار آتش و پخش دود می‌شود و زمان کمتری را برای فرار ساکنان ساختمان باقی می‌گذارد [14]. مطالعه رفتار حریق در ساختمان‌های بلند رو به باد برای بررسی حرکت و کنترل دود حریق مورد نیاز است. چن (Chen) و همکاران، جهت جریان دود و دمای آتش کنترل‌شده با تهویه را در یک محفظه دو دریچه در هنگام وزش باد محیطی به سمت دریچه در ارتفاع بالاتر مورد مطالعه قرار دادند. مشخص شد که یک سرعت باد بحرانی وجود دارد، که در بالای آن جهت حرکت دود به جای اثر شناوری تحت سلطه باد است. همچنین مشخص شد که باد محیط تأثیر پیچیده‌ای بر دمای دود در محفظه دارد. هنگامی که سرعت باد از یک مقدار بحرانی دیگر تجاوز می‌کند، تنها یک حالت ثابت در منحنی افزایش دمای دود ظاهر می‌شود. در غیر این صورت سه حالت ثابت ظاهر می‌گردد. انتقال حرارت از طریق دیوارهای محفظه تأثیر زیادی بر سرعت بحرانی باد دارد. آنها تأثیر باد عرضی بر یک محفظه حریق با دو بازشو را بررسی کردند و روابطی برای پیش‌بینی حرکت دود ارائه دادند [15]. لی و همکاران احتمال پرتاب شعله در یک محفظه تحت باد محیط را بررسی کردند. در ساختمان‌های بلند چند طبقه، راه‌پله یا شافت با پنجره مسیر مهمی برای پراکندگی دود است که می‌تواند به راحتی تحت تأثیر باد خارجی قرار گیرد. نتایج نشان داد که وقتی باد خارجی وجود ندارد یا سرعت آن کم باشد، جریان دو طرفه در درب دیده می‌شود. با افزایش سرعت باد، جریان یک طرفه می‌شود. در سرعت بالای باد، جریان یک‌جهته را می‌توان بدون توجه به نرخ تأمین سوخت در درب مشاهده کرد [16]. جی و همکاران مطالعه آزمایشگاهی، اثر باد خارجی بر رفتارهای شعله و نرخ سوختن در یک شافت مدل مقیاس شده

وقتی که نیروی باد و شناوری حرارتی مخالف هم باشند را انجام دادند. در چنین شرایطی اثر باد و اثر دودکشی با یکدیگر رقابت خواهند کرد که نتیجه این رقابت تغییر در حرکت دود می‌باشد. آنها گزارش دادند که وقتی باد خارجی به اندازه کافی، قوی است اثر دودکشی ممکن است رخ ندهد زیرا گازهای داغ نمی‌توانند وارد شافت شوند و دمای شافت نزدیک به دمای هوای محیط است [17]. باد خارجی در عرض پنجره پیشتر در آثار قبلی بررسی شده است. در حقیقت باد موازی با پنجره‌ها بیشتر اتفاق می‌افتد که در پژوهش‌های پیشین مورد بررسی قرار نگرفت. سوگوا (Sugawa) و همکاران اثر باد خارجی جانبی بر شکل‌های شعله یک محفظه حریق باز را مورد بررسی قرار دادند [18].

ژاو و همکاران تأثیر باد جانبی بر روی حریق در ساختمان-های بلند را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. با توجه به نتایج به دست آمده دود با اثر سینرژیک باد جانبی و اثر دودکشی سریع‌تر پخش می‌شود. میزان نرخ تلفات جرم سوخت و سرعت باد بر دما تأثیرگذار است [19]. با این حال، برای یک ساختار پیچیده‌تر مانند یک ساختمان بلند، باد جانبی نه تنها بر روی شکل شعله تأثیر می‌گذارد بلکه مهم‌تر از آن الگوهای جریان هوا و رفتارهای دود در آتش‌سوزی رخ می‌دهد که می‌بایست مورد ارزیابی قرار گیرند [20]. وقتی باد موازی پنجره یک شافت عمودی یا راه‌پله است، کاهش فشار ظاهر می‌شود و هوای تازه بیرون از دهانه پایین بدون اثر دودکشی به داخل ساختمان مکیده می‌شود. در نتیجه، دود با اثر دودکشی و فشار باد به سرعت بالا می‌رود. رابطه بین اثر باد و شناوری حرارتی در پژوهش‌های پیشین به دست آورده شده است. بنابراین، بررسی مکانیسم حرکت دود و رفتارهای آتش در طول یک آتش‌سوزی ساختمان مرتفع تحت تأثیر باد خارجی جانبی ارزشمند است.

در پژوهشی اثر استفاده از جت فن‌ها و همچنین استفاده از فن‌های برگشت‌پذیر در پارکینگ را بررسی کردند و ثابت کردند که استفاده از این فن‌ها، اثر مطلوبی بر به وجود آمدن گردش هوا در پارکینگ دارد [21]. آنها اثر برهم کنش جریان هوای ورودی از قسمت ورودی پارکینگ بر میزان هدایت منوکسیدکربن به سمت فن خروجی را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این حالت جت فن‌ها توانایی هدایت آلاینده‌ها به سمت خروجی را داشتند. فرناندز و هنریکس در این پژوهش بیان کردند که با استفاده از حل عددی می‌توان به بهترین ترکیب ممکن جهت هدایت مؤثر آلاینده‌ها به همراه در نظر گرفتن جریان هوای ورودی دست یافت.

لئو (Lu) و همکاران در پژوهشی سیستم کنترل دود در یک پارکینگ زیرزمینی را بررسی کردند [22]. آنها با کمک نرم‌افزار پایروسیم به تجزیه و تحلیلی در ارتباط با پارامترهای مهم از قبیل تعداد جت‌فن‌ها، ظرفیت جت‌فن‌ها، میزان استخراج دود در موقع آتش‌سوزی و مقایسه جت‌فن با سیستم تهویه سنتی (داکتی) پرداخته‌اند. آنان به نتیجه رسیدند که سرعت بالای جت‌فن باعث ایجاد دود بیشتری می‌شود. پس مهم است جت‌فنی با سرعت مناسب انتخاب شود، همچنین جت‌فن باعث پخش دود می‌شود اما غلظت دود کمتر است و افراد داخل پارکینگ دید قابل قبولی دارند.

تونی (Tony) با استفاده از نرم‌افزار پایرو سیم اثر جت‌فن بر فعال سازی اسپرینکلر را بررسی کرده است [23]. با فعال شدن جت‌فن، دما پایین می‌آید و باعث می‌شود اسپرینکلرها دیرتر فعال شوند. دکرز و همکارانش، با شبیه‌سازی کنترل دود در یک پارکینگ اثر سرعت تهویه را بررسی کردند. نتایج بیانگر این نکته بود که افزایش سرعت تهویه از یک مقدار مشخص، کمکی به تخلیه دود نمی‌کند، بلکه آتش را گسترش داده و میزان تولید دود را بیشتر می‌کند.

ژانگ و همکارانش، جریان القایی آتش داخل فضای یک اتاق بسته را به روش گردابه‌های بزرگ با مدل زیرشبکه اسماگورینسکی مدل کردند و مشخصه‌های اغتشاشی جریان را محاسبه کردند [24]. مقایسه نتایج حاصل با نتایج تجربی نشان داد که ضعف این مدل در پیشبینی دما و مشخصه‌های اغتشاشی است و این خطا در نزدیکی سقف و با نزدیک شدن به مرز جامد افزایش می‌یابد.

با پیشرفت روزافزون صنایع و رقابت بسیار بالا، نقش دو عامل زمان و هزینه بیش‌ازپیش مهم شده است. کاهش زمان در فرایندهای شبیه‌سازی مهندسی و توانایی پیش‌بینی رفتار سیستم‌ها با استفاده از مدل سازی‌های کامپیوتری، به مهندسان طراح کمک می‌کند که خروجی کار آنها با کمترین خطا و ریسک قابل اجرا باشد.

در این پژوهش یک راه‌پله در یک ساختمان ۶ طبقه در معرض باد خارجی جانبی در نرم‌افزار پایروسیم مورد بررسی

قرار گرفته است و با پژوهش ژاو و همکاران مقایسه شده است. در اینجا سرعت باد و حرارت آزاد شده مقادیر مختلفی در نظر گرفته شـــدند و پخش دود و دما در اثر باد خارجی جانبی به دست آمدند.

معادلات حاکم

پایروسیم یک رابط گرافیکی برای شبیه‌سازی دینامیک آتش می-باشد. شبیه‌ساز دینامیک آتش، حالات مختلف آتش‌سوزی را با استفاده از یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی برای جریان سیالات حامل آتش است.

این مدل شکلی از معادلات ناویراستوکس را که برای سیالات با سرعت کم با تأکید بر دود و انتقال حرارت از آتش است، به‌صورت عددی حل می‌کند. با دقت بالایی حرکت و رفتار دود، دما و گازهای سمی منتشر شده را شبیه‌سازی کرده و مورد تحلیل قرار می‌دهد.

با این نرم‌افزار به راحتی می‌توان با تنظیم پارامترهای مختلف یک آتش ساختگی را در یک محیط مشخص راه بیندازید و سپس مشاهده می‌شود که این آتش به چه صورتی گسترش پیدا می‌کند، دود حاصل از آنچه نوع حرکاتی دارد و چه گازهای سمی با چه غلظت و دمایی منتشر می‌شود. این اطلاعات برای طراحی ایمن‌تر ساختمان و محل‌های مسکونی بسیار ارزشمند خواهد بود.

این نرم‌افزار شامل حل عددی از معادلات ناویرا ستوکس در جر یان هدا یت حرارتی و کم ســـر عت با تمرکز بر روی ویژگی‌های انتقال دود و حرارت نا شی از حریق را شبیه سازی می‌کند. مدل‌های شبیه‌ساز دینامیک آتش می‌توانند دود، حرارت، مونوکســـیدکربن ومواد دیگر را در طول آتش‌ســـوزی پیش‌بینی کنند. نتایج حا صل از این شبیه سازی‌ها، برای اطمینان‌بخ‌شی به ایمنی ساختمان قبل از ساخت‌و ساز، ارزیابی گزینه‌ها یا ایمنی ساختمان‌های موجود، باز‌سازی آتش‌سوزی برای تحقیقات پس از حادثه و کمک به آموزش آتش‌نشـانها اسـتفاده شـده اسـت. نرم‌افزار از معادلات حاکم زیر استفاده می‌کند [25]:

– بقای جرم

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla.\rho\vec{u} = \dot{m}_b''' \quad (1)$$

– بقای اندازه حرکت

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{u}) + \nabla.\rho uu = \rho\vec{g} - \nabla\vec{p} + \nabla.\overrightarrow{\tau_{ij}} \quad (2)$$

– پایستاری جرم

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla.\rho hu = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \dot{q}_b''' - \nabla.\dot{q}'' + \varepsilon \quad (3)$$

– معادله حالت گاز کامل

$$p = \frac{\rho RT}{M} \quad (4)$$

– آنتالپی: آنتالپی بر اســاس دما طبق رابطه زیر به دســت می‌آید [26]:

$$h = \int_{T_0}^{T} C_P(T)dT \quad (5)$$

$$\Delta P = \frac{\rho_0 U^2}{2} \quad (6)$$

$$U = k\,Q^{1/3} + b \quad (7)$$

$$k = 0/47\; - 0/12v \quad (8)$$

$$b = 0/57v\; - 0/15 \quad (9)$$

شـــبیه‌ســـازی حریق در نرم‌افزار از طریق روش گردابه‌های بزرگ برای جریان آشفته محاسبه می‌شود. برای به دست آوردن نتایج مناسب حریق می‌بایست شبکه محاسباتی ابعاد قابل قبولی داشـــته باشـــد. برای اســـتقلال حل از شـــبکه، می‌بایســـت طول م شخ صه به د ست آید. رابطه زیر برای طول م شخ صه به کار می‌رود [27]:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty C_p T_\infty \sqrt{g}}\right)^{0/4} \quad (10)$$

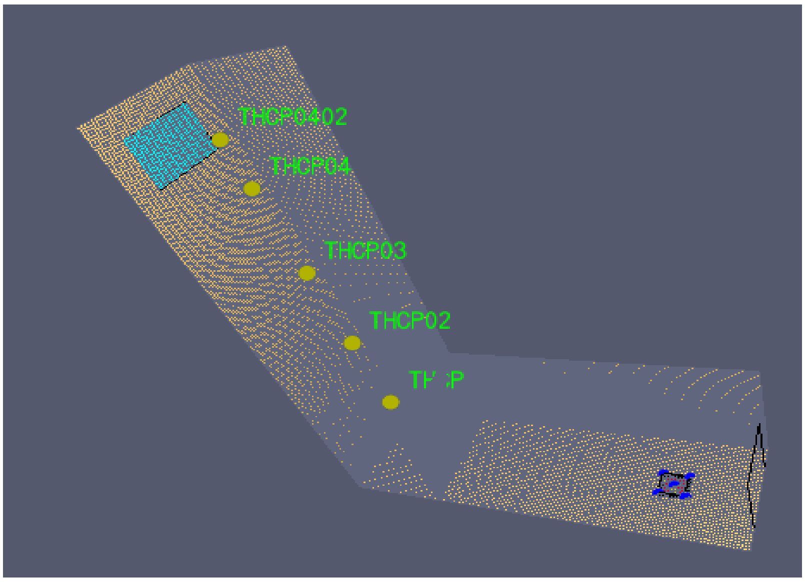
با مدل‌کردن حریق، می‌توان دما، فشار، سرعت و ترکیبات شیمیایی در هر سلول را برای گام‌های زمانی کوچک محاسبه کرد. معمولا در هر تکرار میلیون‌ها سلول وجود دارد. در پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار پایروسیم، معادلات ناویراستوکس، انرژی، بقای جرم، حریق و توزیع دود حل و برای آشفتگی از مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شده است. ادی‌های بزرگ به‌طور مستقیم و با استفاده از شبکه حل و گردابه‌های کوچک از مدل زیرشبکه اسماگورینسکی به دست آورده شد.

شبیه‌سازی

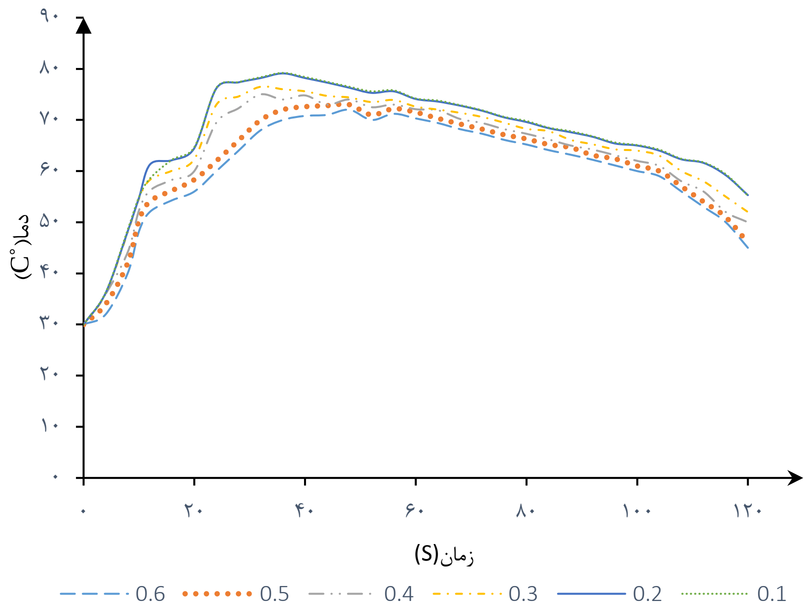
هندسه مورد بررسی

هندسه مورد بررسی در پژوهش ژاو و همکاران یک شافت

عمودی یا راه‌پله با شش طبقه و یک راهرو بلند می‌باشد. در این پژوهش شافت و راهرو مورد نظر در نرم‌افزار پایروسیم شبیه‌سازی شده است. ارتفاع شافت ۳۰ متر، طول آن ۴ متر و عرض ۳ متر می‌باشد. ارتفاع هر طبقه ۵ متر است. راهرو به طول ۱۲ متر، عرض ۴ متر و ارتفاع ۵ متر می‌باشد. درب ورودی راهرو دارای ابعاد ۴×۳ متر است. پنجره با ابعاد ۲×۳ متر در طبقه بالا قرار دارد. باد به صورت جانبی به پنجره طبقه بالا می‌وزد. برای اندازه‌گیری دما ۵ ترموکوپل در شافت یا راه‌پله قرار داده شده است. مقدار حرارت آزاد شده ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ کیلووات و مقدار سرعت باد جانبی ۰ تا ۱/۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. دمای محیط ۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. هندسه مورد نظر در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱ هندسه راه‌پله یا شافت در نرم‌افزار پایروسیم



شکل ۲ نمودار دما در سایزهای مختلف شبکه

استقلال حل از شبکه

استقلال از شبکه، انتخاب بهینه‌ترین شبکه ممکن برای دریافت پاسخ‌های صحیح می‌باشد. به عبارت دیگر اگر شبکه‌بندی بسیار درشت باشد، مسلما جواب‌های شبیه‌سازی قابل اعتماد نخواهد بود و اگر مش‌بندی بسیار ریز باشد، باز هم به علت خطای گرد کردن و هزینه محاسباتی بالا احتمالا جواب‌های صحیحی به دست نمی‌آید. به منظور کاهش خطای اندازه شبکه در شبیه‌سازی‌های عددی، باید مناسب‌ترین سایز شبکه انتخاب شود تا بتوان تأثیر اندازه شبکه بر روی حل را حذف نمود. به همین دلیل برای اندازه‌های مختلف شبکه‌بندی نتایج حل با یکدیگر مقایسه می‌گردد. در این پژوهش، هندسه مورد نظر با سایز ۰/۶، ۰/۵، ۰/۴، ۰/۳، ۰/۲ و ۰/۱ متر شبکه‌بندی شد و نتایج حل دما در شرایط بدون باد در ارتفاع ۲ متری درون راه‌پله با مقدار حرارت آزاد شده ۹۰۰ کیلووات در ۱۲۰ ثانیه با یکدیگر مقایسه گردید. در شکل (۲)، نتایج دما در این شبکه‌بندی‌ها مشخص شده است. همان طور که از شکل مشخص می‌باشد، در سایز ۰/۲ و ۰/۱ متر تقریبا نمودارها بر روی هم منطبق شده‌اند. به‌همین دلیل حل برای شبکه‌بندی با سایز ۰/۲ متر انجام شد.

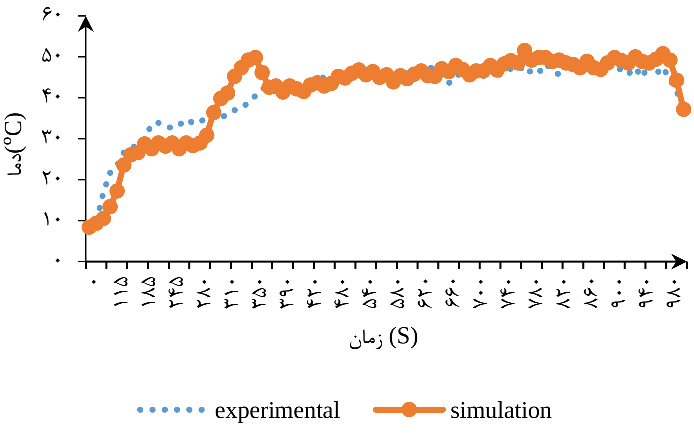
به‌دلیل اینکه در راه‌پله، تغییرات پارامترهای مورد نظر اهمیت دارد، شبکه محاسباتی غیر یکنواخت انتخاب شد و در راه‌پله سایز شبکه ۰/۱ متر در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث‌ها

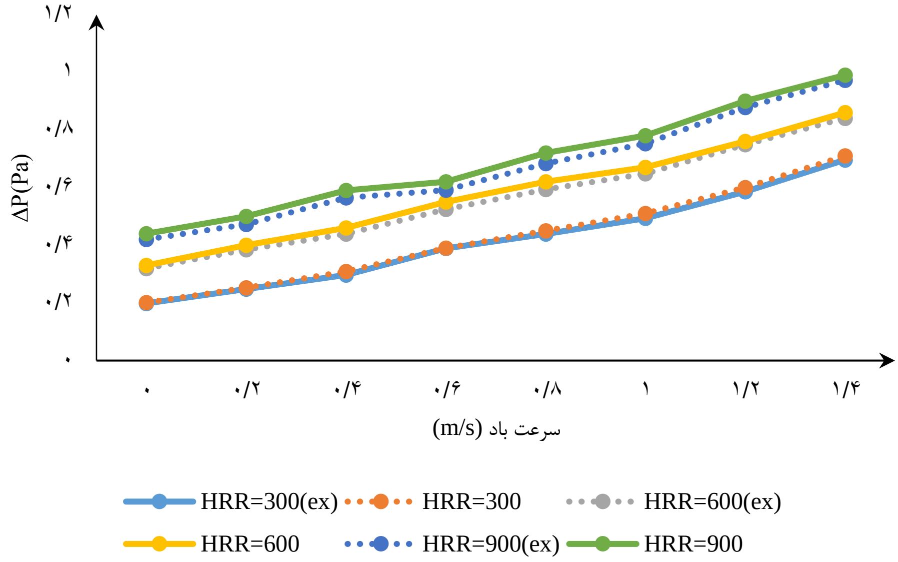
در این پژوهش برای بررسی حریق در راه‌پله مورد نظر سناریوهای مختلف در نظر گرفته شد. گرمای آزاد شده ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ کیلووات فرض شد. برای هر کدام از سه حالت گرمای آزاد شده سرعت باد بین ۰ تا ۱/۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. نتایج مربوط به دما، غلظت کربن مونوکسید و اختلاف فشار در نمودارهای مختلف ارائه شده است.

شکل (۳) مقایسه نتایج دمای آزمایشگاهی ژاو و همکاران با نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در این شکل دما در راه‌پله در ارتفاع ۲/۹ متری با گرمای آزاد شده ۳۰۰ کیلووات با یکدیگر مقایسه شده است. در این حالت سرعت باد ۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. همان طور که از شکل (۳) مشخص است نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی با هم مطابقت دارند. از شکل مشاهده می‌شود که دمای داخل شافت به سرعت پس از احتراق افزایش می‌یابد، که نشان می‌دهد دود داغ در داخل شافت جریان می‌یابد که دود توسط شناوری و اثر دودکشی حرکت می‌کند. درجه حرارت در شافت به سرعت افزایش می‌یابد تا اینکه حالت پایدار در ۴۰۰ ثانیه به دست می‌آید.

با توجه به اینکه داده‌های آزمایشگاهی ژاو و همکاران و داده‌های نرم‌افزاری مطابقت داشتند در ادامه نتایج مختلف نرم‌افزاری برای هندسه مورد نظر ارائه شده است. شکل (۴)، اختلاف فشار محاسبه شده درب پایین با سرعت باد را در حالت آزمایشگاهی و عددی مقایسه می‌کند. اختلاف فشار، اختلاف فشار حرارتی و افت فشار ناشی از باد جانبی خارجی است که با سرعت باد خارجی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. برای محاسبه اختلاف فشار از رابطه (۶) استفاده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود داده‌های آزمایشگاهی ژاو و همکاران با داده‌های عددی به دست آمده مطابقت دارند و حدود ۵٪ اختلاف دارند. با توجه به نتایج، با افزایش سرعت باد و افزایش گرمای آزاد شده اختلاف فشار افزایش می‌یابد. بر اساس تحلیل فوق، می‌توان نتیجه گرفت که باد خارجی جانبی اثر دودکشی را تقویت کرده و موجب انتشار گازهای داغ درون راه‌پله می‌شود.



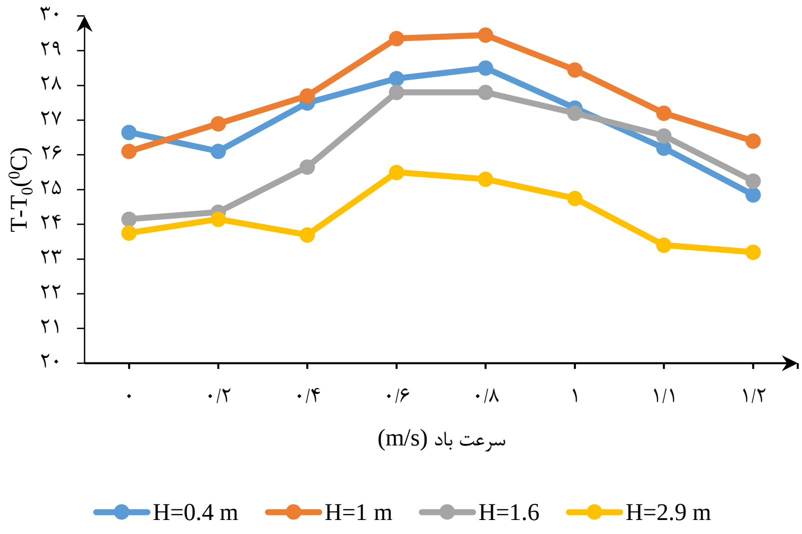
شکل ۳ مقایسه دمای آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در ارتفاع ۲/۹ متری با گرمای آزاد شده ۳۰۰ کیلووات و سرعت باد ۱ متر بر ثانیه



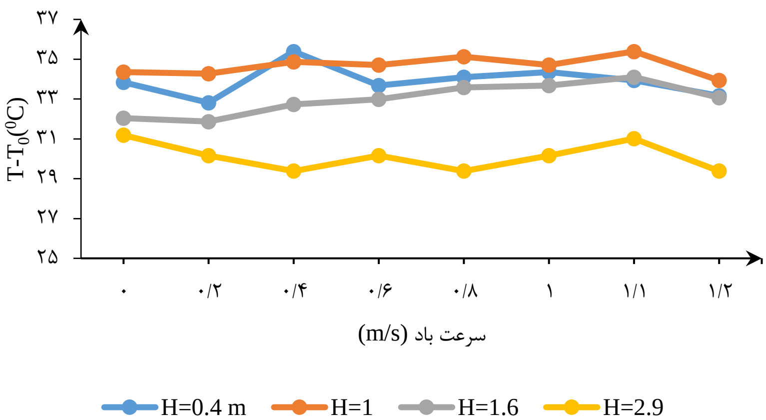
شکل ۴ مقایسه اختلاف فشار درب پایین با سرعت باد در حالت آزمایشگاهی و عددی با گرمای آزاد شده متفاوت

در شکل (۵-الف)، (۵-ب) و (۵-ج) دمای دود در سرعت‌های مختلف باد و گرمای آزاد شده متفاوت پس از گذشت ۳۰۰ ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. دما در راه‌پله در ارتفاع مختلف بررسی شد. مشاهده می‌شود که دما به طور یکنواخت در شافت توزیع شده و اختلاف آن کمتر از ۵ درجه سانتی‌گراد است. تغییرات دما با سرعت باد جانبی را می‌توان به دو نوع تقسیم کرد: برای گرمای آزاد شده ۳۰۰ کیلووات دمای ستون ابتدا به یک مقدار اوج می‌رسد سپس با افزایش سرعت باد کاهش می‌یابد. این را می‌توان توسط اثرات دوگانه باد جانبی توضیح داد. از یک طرف، هوای تازه استخراج شده در راهرو تبخیر سوخت را افزایش می‌دهد و احتراق را تشدید می‌کند که منجر به افزایش دمای ستون می‌شود. از طرفی هوای محیطی که به ستون وارد شده است یک اثر خنک‌کننده قوی دارد. همچنین زمانی که سرعت باد بالا است می‌تواند باعث انتقال حرارت هم‌رفتی قوی از ستون به مرزها شود. در اینجا، اثر خنک‌کنندگی باد می‌تواند دما را کاهش دهد. در گرمای آزاد شده بیشتر به نظر می‌رسد که تغییرات دما در محدوده سرعت باد مشهود نیست. دلیل این امر، افزایش گرمای آزاد شده بر اثر خنک‌کنندگی باد تأثیر می‌گذارد و دما در این محدوده سرعت باد کاهش نمی‌یابد. همچنین نتایج نشان داد گرمای آزاد شده بر پیک دمایی مؤثر بوده است.

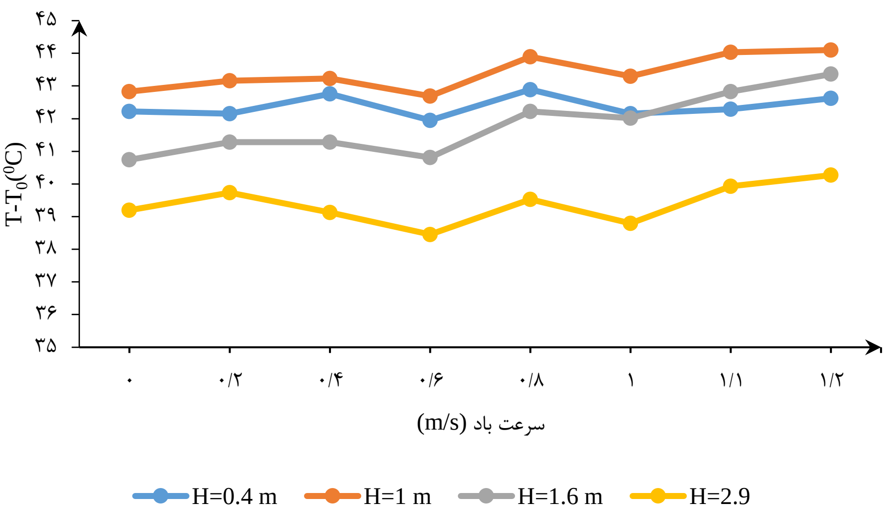
گازهای سمی علت اصلی مرگ و میر در آتش‌سوزی‌ها می‌باشد. در شکل (۶-الف)، (۶-ب) و (۶-ج) غلظت کربن مونوکسید در سرعت‌های مختلف باد و گرمای آزاد شده متفاوت بررسی شد. همان طور که مشاهده می‌شود غلظت کربن مونوکسید به طور یکنواخت در راه‌پله با توجه به باد خارجی توزیع شده است. در هنگام باد، دود کندتر به سمت بالا حرکت می‌کند و باد مانع جریان هوای ناکافی به دلیل کاهش فشار از درب ورودی می‌شود، در نتیجه غلظت کربن مونوکسید بیشتر می‌گردد. با توجه به اینکه منبع آتش در نزدیکی درب قرار دارد، کاهش جریان هوای درب ورودی، تأثیر مستقیمی بر احتراق ناقص و تولید بیشتر گاز کربن مونوکسید دارد. با افزایش ارتفاع راه‌پله مقدار غلظت دود افزایش می‌یابد. از نتایج به دست آمده مشخص شد اگر گرمای آزاد شده ثابت باشد، غلظت کربن مونوکسید با افزایش سرعت باد خارجی افزایش می‌یابد. در سرعت باد ۱/۲ متر بر ثانیه غلظت کربن مونوکسید، تقریبا ۳٪ نسبت به حالت بدون باد بیشتر است.



(الف)

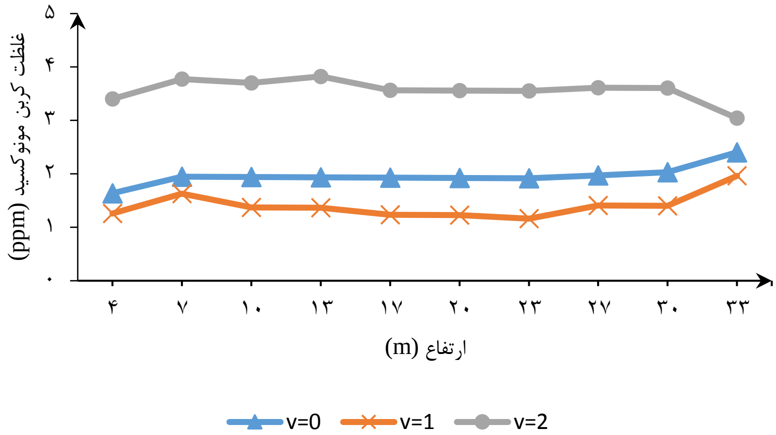


(ب)

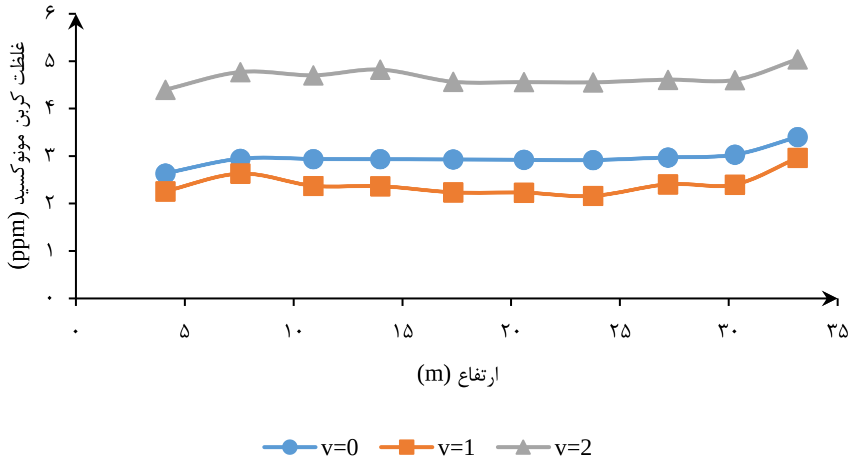


(ج)

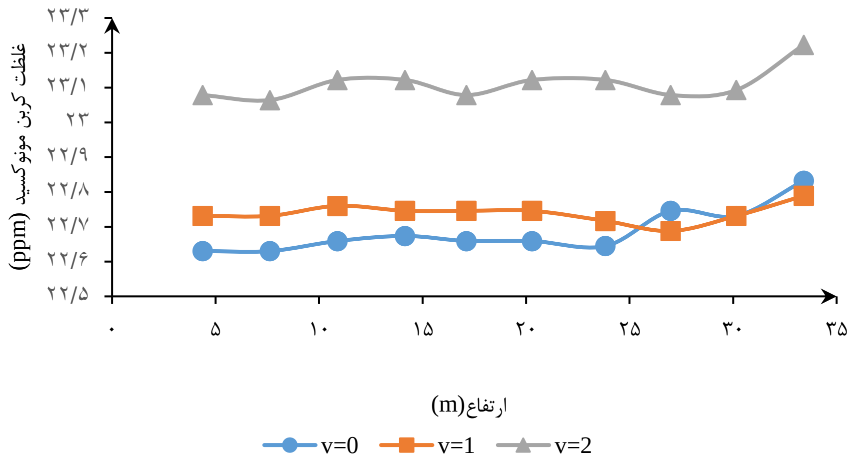
شکل۵ (الف) دمای دود در گرمای آزاد شده ۳۰۰ کیلووات با سرعت باد مختلف در زمان ۳۰۰ ثانیه، (ب) دمای دود در گرمای آزاد شده ۶۰۰ کیلووات در سرعت مختلف باد در زمان ۳۰۰ ثانیه، (ج) دمای دود در گرمای آزاد شده ۹۰۰ کیلووات در سرعت باد مختلف در زمان ۳۰۰ ثانیه



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶ (الف) غلظت دود در گرمای آزاد شده ۳۰۰ کیلووات در زمان ۳۰۰ ثانیه، (ب) غلظت دود در گرمای آزاد شده ۶۰۰ کیلووات در زمان ۳۰۰ ثانیه، (ج) غلظت دود در گرمای آزاد شده ۹۰۰ کیلووات در زمان ۳۰۰ ثانیه

نتیجه‌گیری

در این پژوهش پخش دود، دمای دود و خصوصیات حریق در یک راه‌پله یا شافت یک ساختمان بلند در معرض باد جانبی محیطی مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج آزمایشگاهی ژاو و همکاران مقایسه گردید. نتایج این پژوهش برای مهندسان و آتش‌نشان‌ها در طراحی سیستم کنترل دود حریق و خروج افراد گیر افتاده در حریق با توجه به تأثیر باد جانبی بسیار اهمیت دارد.

هنگامی که باد خارجی به پنجره بالایی راه‌پله یا شافت می‌وزد، کاهش فشار رخ می‌دهد. با توجه به جریان باد از درب ورودی، به دلیل افت فشار دود به سمت راه‌پله حرکت می‌کند. افزایش سرعت باد و کاهش فشار بیشتر، منجر به انتشار سریع‌تر دود می شود. با توجه به کاهش فشار میزان هوای وارد شده از درب ورودی کاهش می‌یابد که موجب احتراق ناقص می‌گردد. با توجه به احتراق ناقص، غلظت گاز سمی کربن مونوکسید افزایش می‌یابد. با افزایش گازهای سمی افراد بسیار در معرض خطر قرار گرفته و می‌بایست با سرعت بیشتری ساختمان تخلیه شود.

فهرست علامت‌ها

علائم انگلیسی

C_p	گرمای ویژه در فشار ثابت [J/kg.K]
D^*	طول مشخصه
$\dot{m}_b'''$	نرخ تولید گازهای در حال سوختن [kg/m³.s]
$\dot{Q}$	نرخ حرارت آزاد شده [W/m²]
$\dot{q}''$	شار حرارتی [W/m²]
$\dot{q}'''$	نرخ حرارت آزاد شده بر واحد حجم [W/m³]
$\dot{q}_b'''$	شار حرارتی به کار گرفته شده از طریق گازهای در حال سوختن برای احتراق و ادامه فرایند سوختن [W/m³]
R	ثابت گاز کامل [J/kg.K]
T_∞	دمای محیط [K]
v	سرعت باد [m/s]

علائم یونانی

ρ	چگالی [kg/m³]
ε	نرخ اتلاف [W/m³]
τ_{ij}	تانسور تنش برشی [N/m²]

واژه‌نامه

حریق	Fire
تخلیه	Evacution
مدیریت تخلیه	Evacuatiuon management
اثر دودکشی	Stack effect
جریان آشفته	Turbulent flow
گسترش دود	Spreading smoke
توده دود	Plume
تهویه	Ventilation
گردابه‌های بزرگ	Large eddy
باد جانبی	Side wind
گرمای آزاد شده	Heat release

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] X. Wang, C. Fleischmann, and M. Spearpoint, “Applying the FDS pyrolysis model to predict heat release rate in small-scale forced ventilation tunnel experiments,” *Fire Safety Journal*, vol. 112, pp. 102946, 2020. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.102946

[2] B. Manzoor, I. Othman, and A. Waheed, “Accidental safety factors and prevention techniques for high-rise building projects – A review,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 13, no. 5, pp. 101723, 2022. https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101723

[3] H. W. Yao, W. L. Dong, D. Liang, A. Rogner, and J. W. Lai, “Simulation of full-scale smoke control in atrium.” *Procedia Engineering*, vol. 1, no. 11, pp. 608-613, 2011. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.703

[4] X. Q. Sun, L. H. Hu, W. K. Chow, Y. Xu, and F. Li, “A theoretical model to predictplume rise in shaft generated by growing compartment fire,” *Elsevier International Journal of Heat and Mass Transfer* , vol. 54, no. 4, pp. 910-920, 2011. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.10.012

[5] H. Omrany, A. Ghaffarianhoseini, R. Chang, A. Ghaffarianhoseini, and F. Pour Rahimian, “Applications of Building information modelling in the early design stage of high-rise buildings,” *Automation in Construction*, vol. 1, no. 152, pp. 104934, 2023. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104934

[6]W. X. Shi, J. Ji, J. H. Sun, S. M. Lo, L. J. Li, and X. Y. Yuan, “Experimental study on influence of stack effect on fire in the compartment adjacent to stairwell of high rise building,” *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 20, no. 1, pp. 121-131, 2014. https://doi.org/10.3846/13923730.2013.802729

[7] D. Qi, L. Wang, and R. Zmeureanu, “The Effects of Non-uniform Temperature Distribution on Neutral Plane Level in Non-adiabatic High-Rise Shafts During Fires,” *Fire Technology*, vol. 53, no.1, pp. 153-172, 2017. https://doi.org/10.1007/s10694-015-0554-2

[8] J. Ji, L. J. Li, W. X. Shi, C. G. Fan, and J. H. Sun, “Experimental investigation on the rising characteristics of the fire-induced buoyant plume in stairwells,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 64, no. 1, pp. 193-201, 2013. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.04.030

[9] L. J. Li, J. Ji, W. X. Shi, Z. H. Gao, J. H. Sun, and J. P. Zhu, “A modified turbulent mixing model with the consideration of heat transfer between hot buoyant plume and sidewalls in a closed stairwell,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 84, no. 1, pp. 521-528, 2015. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.012

[10] L. Xue, S. Yuan, and Q. He, “A Comparative Study on the Influence of Ventilation on Weather- and Fire-Induced Stack Effect in the Elevator Shafts of a High-Rise Building,” *Fire Technology*, vol. 54, no. 1, pp. 163-186, 2018. https://doi.org/10.1007/s10694-017-0679-6

[11] J. Ji, X. Yuan, K. Li, L. Yang, and J. Sun, “A mathematical model for burning rate of n-heptane pool fires under external wind conditions in long passage connected to a shaft,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 116, no. 1, pp. 91-99, 2017. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.144

[12] L. Hu, X. Sun, X. Zhang, and F. Ren, “Facade flame height and horizontal extending distance from opening of compartment fire with external sideward wind,” *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 37, no. 3, pp. 3859-3867, 2019. https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.201

[13] J. Ji, Y. Y. Fu, C. G. Fan, Z. H. Gao, and K. Y. Li, “An experimental investigation on thermal characteristics of sidewall fires in corridor-like structures with varying width,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 84, no. 1, pp. 562–570, 2015. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.020

[14]H. Kikuchi, Y. Tamura, H. Ueda, and K. Hibi, “Dynamic wind pressures acting on a tall building model - Proper orthogonal decomposition,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 69, no. 1, pp. 631–649, 1997. https://doi.org/10.1016/S0167-6105(97)00193-1

[15] H. Chen, N. Liu, and W. Chow, “Wind effects on smoke motion and temperature of ventilation-controlled fire in a two-vent compartment,” *Building and Environment*, vol. 44, no. 12, pp. 2521-2526, 2009. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.04.008

[16] M. Li, Z. Gao, J. Ji, K. Li, and J. Sun, "Wind effects on flame projection probability from a compartment with opposing openings," *Fire Safety Journal*, vol. 91, pp. 414-421, 2017. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.04.037

[17] J. Ji, X. Yuan, K. Li, and J. Sun, "Influence of the external wind on flame shapes of n-heptane pool fires in long passage connected to a shaft." *Combustion and Flame*, vol. 162, no. 5, pp. 2097-2107, 2015.

[18] O. Sugawa, D. Momita, and W. Takahashi, "Flow Behavior Of Ejected Fire Flamelplume From An Opening Effected By External Side Wind," *Fire Saf. Sci.*, vol. 5, pp. 249-260, (1997).

[19] L. Zhu, X. Yuan, Z. Gao, and J. Ji, "Experimental Investigation of Effect of ExternalSide Wind on Fire Behaviors in a Corridor Connected to a Shaft," *Fire Technology.*, vol. 56, no. 2, pp. 863-881, 2020. https://doi.org/10.1007/s10694-019-00907-8

[20] J. Ji, L. Zhu, L. Ding, L. Yu, and H. Wan, "Numerical Investigation of External WindEffect on Smoke Characteristics in a Stairwell," *Fire Technology.*, vol. 56, no. 4, pp. 1681–1702, 2020. https://doi.org/10.1007/s10694-020-00948-4

[21] S. C. Li, Y. Chen, X. Chen, and G. G. Jing, "Engineering numerical simulation on the amount of make-up air for mechanical smoke exhaust in atrium," *Procedia Engineering*, vol. 1, no. 11, pp. 379-384, 2011. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.672

[22] S. Lu, Y. H. Wang, R. F. Zhang, and H. P. Zhang, "Numerical study on impulse ventilation for smoke control in an underground car park," in *Procedia Engineering*. vol. 11, pp. 369-374, 2011. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.671

[23] P. A. Enright, "Impact of jet fan ventilation systems on sprinkler activation," *Case Studies in Fire Safety*, vol. 1, pp. 1-7, 2014. https://doi.org/10.1016/j.csfs.2013.11.002

[24] W. Zhang, A. Hamer, M. Klassen, D. Carpenter, and R. Roby, "Turbulence statistics in a fire room model by large eddy simulation," *Fire Safety Journal*, vol. 37, no. 8, pp. 721-752, 2002. https://doi.org/10.1016/S0379-7112(02)00030-9

[25] Z. Gao, X. Yuan, J. Ji. Y. Li, and L. Yang, "Influence of stack effect on flame shapes of gas burner fires," *Applied Thermal Engineering*, vol. 127, no. 25, pp. 1574-1581, 2017. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.110

[26] Z. Nurizaty *et al.* "Experimental Investigation on Post-Fire Performances of Fly Ash Concrete Filled Hollow Steel Column," *Int. J. High-Rise Build.*, vol. 10, no. 4, pp. 335-344, (2021).

[27] V. Kodur, P. Kumar, and M. M. Rafi, "Fire hazard in buildings: review, assessment and strategies for improving fire safety," *PSU Res. Rev.*, vol. 4. No, 1, pp. 1-23, 2020. https://doi.org/10.1108/PRR-12-2018-0033